

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Alumne (*nom i cognoms*):

Clara Portalés Nasarre

Títol TFG:

Estudio, diseño e implementación de un sistema para la obtención de caminos óptimos para detectar incendios causados por rayos

Director/a del TFG:

Antoni Guasch Petit

Convocatòria de lliurament del TFG:

QP2019/2020

Contingut d'aquest volum:

## **DOCUMENT 1.- MEMÒRIA**

---

# Estudio, diseño e implementación de un sistema para la obtención de caminos óptimos para detectar incendios causados por rayos

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Clara Portalés Nasarre

Director: Antoni Guasch Petit

Fecha: 30 de junio de 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

## Dedicatoria

*Para Yayo, que me enseñó que en esta vida solo se escogen los amigos... Y no me advirtió del Trabajo de Fin de Grado.*

## Resumen

Este estudio pretende encontrar trayectos óptimos para los helicópteros del *Departament de Bombers* en caso de caída de rayos y potencial riesgo de incendio.

El estudio se lleva a cabo a partir de datos meteorológicos, la información aportada por el cuerpo de bomberos y con el lenguaje de programación Octave.

Mediante técnicas de *clustering*, se agrupan puntos de impacto de rayos cercanos que se puedan vigilar desde un mismo lugar, si se desea. También, se traza un camino que una dichos puntos de impacto con un helipuerto del cuerpo de bomberos.

El algoritmo devuelve caminos suficientemente directos para el volumen de datos estudiados y podría integrarse, en un futuro, en un sistema de información geográfica.

## Abstract

This study aims to find optimal paths for helicopters from the fire department in Catalonia, to prevent lightning-caused wildfires.

The study takes into account meteorological data, information provided by the fire department and is coded in Octave.

At first and if needed, a clustering algorithm groups lightning impact points close enough to be overseen from a single location. A path containing every desired location and the helicopter base is obtained.

Currently, paths are simple enough for the studied cases and the code could be tweaked to be implemented in a geographic information system.

## Declaración de honor

I declare that,

the work in this Degree Thesis is completely my own work,

no part of this Degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit,

all references have been clearly cited,

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by *The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Clara Portalés Nasarre

30/06/2020

Student Name

Signature

Date

Title of the Thesis: Estudio, diseño e implementación de un sistema para la obtención de caminos óptimos para detectar incendios causados por rayos.

## Tabla de Tablas

Tabla 1. Bases operativas de los medios aéreos (campaña forestal 2015) .....	8
Tabla 2. Tabla resumen de las propiedades de los algoritmos de clustering .....	26
Tabla 3. Explicación de la matriz de distancias.....	28
Tabla 4. Resumen algoritmos de caminos óptimos.....	31

## Tabla de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del método de regresión .....	15
Figura 2. Diagrama de flujo del método de clasificación .....	15
Figura 3. Diagrama de flujo de K-medias.....	15
Figura 4. Elementos del algoritmo de caminos óptimos .....	16
Figura 5. Resumen de algoritmos de optimización .....	17
Figura 6. Representación de los puntos de caída de rayos .....	19
Figura 7: Gupta, A. El método del codo.(Gupta [sin fecha]) .....	20
Figura 8. Comparativa de configuraciones finales para K=7 y diferentes centroides iniciales	21
Figura 9. Diagrama de flujo de la propuesta de solución .....	22
Figura 10. Selección de centroides iniciales .....	23
Figura 11. Evolución de la ubicación de los centroides .....	24
Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo DBSCAN.....	26
Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo de caminos óptimos.....	29
Figura 14. Arcos cruzados.....	30
Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo de búsqueda de cruce de arcos .....	31
Figura 16. Recorrido para un caso de pocos rayos sin clustering.....	33
Figura 17. Recorrido para un caso de muchos rayos sin clustering.....	34
Figura 18. Clústers para el tercer caso de experimentación .....	35
Figura 19. Ruta caso clustering y camino óptimo.....	36
Figura 20. Visión de la localización del incendio registrada y la real. De Departament de Bombers. ....	39

## Contenido

Resumen.....	I
Abstract .....	I
Declaración de honor .....	II
1. Introducción .....	7
1.1 Objeto .....	7
1.2 Alcance.....	7
1.3 Especificaciones básicas.....	7
1.4 Justificación.....	10
2. Desarrollo .....	13
2.1 Antecedentes.....	13
2.1.1 Incendios causados por rayos .....	13
2.1.2 Minería de datos .....	14
2.1.3 Caminos óptimos.....	16
2.2 Planteamiento y selección de alternativas escogidas.....	17
2.2.1 <i>Clustering</i> .....	17
2.2.2 El problema del vendedor ambulante.....	18
2.2.3 Coordenadas UTM.....	18
3. Desarrollo de la solución propuesta.....	19
3.1 Obtención de clústers .....	19
3.1.1 K-medias.....	20
3.1.2 DBSCAN .....	25
3.2 Cálculo de caminos óptimos .....	27
3.2.1 Algoritmo de fuerza bruta.....	27
3.2.2 Algoritmo de variaciones aleatorias.....	27
3.2.3 Algoritmo de búsqueda de cruces.....	29



4. Experimentación.....	33
4.1 Tormenta seca, pocos rayos, sin <i>clustering</i> .....	33
4.2 Tormenta seca, muchos rayos, sin <i>clustering</i> .....	34
4.3 Tormenta seca, muchos rayos, con <i>clustering</i> .....	35
5. Resultados .....	37
5.1 Resumen económico.....	37
5.2 Implicaciones ambientales.....	37
5.3 Planificación .....	37
6. Conclusiones.....	39
7. Normativa.....	41
8. Bibliografía.....	42
9. Anexos .....	45

## 1. Introducción

### 1.1 Objeto

El objeto de este estudio es encontrar un sistema que halle el camino óptimo a recorrer por un helicóptero de bomberos en busca de incendios causados por rayos. Este camino debe abarcar el mayor número de lugares donde hayan caído rayos y debe recorrerse en un tiempo razonable.

### 1.2 Alcance

El estudio constará de un análisis de datos de los puntos de caída de rayos en un periodo determinado.

Se agruparán dichos lugares mediante algoritmos de *machine learning* y se idearán los caminos mínimos entre estos grupos teniendo en cuenta el radio de visibilidad desde el helicóptero.

Se experimentará con el algoritmo para una serie de casos que puedan ser de utilidad para los bomberos. Se analizará la ejecución de la solución propuesta para tres casos distintos planteados por los bomberos y que serían las que tendría que ser capaz de resolver los algoritmos a desarrollar en una situación real.

Se analizará la situación actual tanto de la técnica como de la normativa referente al problema a resolver y se considerará la manera de actuar de los bomberos en la actualidad y, en la medida de lo posible, sus necesidades.

Se valorarán los resultados obtenidos con el fin de recomendar como habría que continuar el estudio en caso de querer implementar un sistema como este en el futuro.

### 1.3 Especificaciones básicas

El GRAF (*Grup de recolzament d'Actuacions Forestals*) es el equipo del cuerpo de bomberos encargado, entre otras cosas, de sobrevolar la geografía catalana en helicóptero para detectar el inicio de incendios causados por la caída de rayos. Los vuelos en helicóptero están sujetos a restricciones de:

- tiempo de vuelo: la circular operativa 16-B –Bravo 16- (ver Anexo) limita el tiempo máximo ininterrumpido de vuelo a 3 horas. No obstante, desde el GRAF se especifica

que el tiempo máximo de recorrido se acota a las 2 horas. Bravo 16 incorpora un conjunto mucho más amplio de restricciones. No obstante, es razonable suponer que estas restricciones no serán aplicables en este contexto de vuelos esporádicos.

- las bases: razonablemente se asignará la misión de recorrer los puntos de impacto al helicóptero que este más cerca de estos puntos. Durante la campaña forestal el departamento de bomberos tiene desplazados helicópteros por todo el territorio. Por ejemplo, la tabla siguiente muestra las bases operativas de los medios aéreos en la campaña del 2015.

*Tabla 1. Bases operativas de los medios aéreos (campaña forestal 2015)*

<b>Helicópteros de mando</b>	<b>Helicópteros bombarderos</b>	<b>Aviones de vigilancia y ataque</b>
Reus	Móra d'Ebre	Ódena
Lleida	Tiurana	Sabadell
Ullastrell	Balaguer	
Girona	Montmell	
Manresa	Dosrius	
	Garraf	
	Sabadell	
	Manresa	
	Orriols	
	Maçanet de la Selva	
	Prades	

- las condiciones meteorológicas: no es recomendable efectuar estas misiones de vigilancia en el transcurso de la tormenta por el peligro que puede representar el impacto de un rayo en el helicóptero. Generalmente se espera al paso de la tormenta. Solo en circunstancias especiales, cuando el índice de sequía es elevado, se autoriza la misión mientras la tormenta sigue activa.
- la luz solar: se vuela entre el orto y el ocaso. Es posible que meteorológicamente se den las condiciones idóneas, pero sea demasiado tarde para acabar la ruta de día.

En caso de caída de rayos, se pueden dar tres escenarios:

1. Rayos acompañados de precipitación
2. Rayos aislados
3. Tormentas secas.

Los rayos que caen acompañados de mucha precipitación no se suelen vigilar. Por la propia naturaleza de la tormenta, la humedad del combustible apagaría su ignición. La ubicación de un rayo ocasional se puede visitar si la situación lo requiere. El escenario más problemático y el que se va a estudiar es aquel en el que caen muchos rayos en zonas de aparente tendencia a arder. En estas ocasiones se suele esperar, al menos, al día siguiente cuando las condiciones meteorológicas son más favorables para volar. No obstante, si el riesgo de incendio es elevado, se pueden efectuar vuelos el mismo día de la tormenta.

Para poder visitar todos los emplazamientos se trazan rutas. Se hace de manera manual. Lo realiza un operario teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente: el índice de sequía y el tiempo de vuelo del que se dispone por normativa y combustible. Se trabaja con coordenadas, pero no se dispone de un mapa con la ruta en el helicóptero que permita asegurarse de qué ubicaciones se han sobrevolado. Cabe mencionar que el GRAF tiene a su disposición varios helicópteros por provincia y que se pueden trazar diferentes rutas simultáneas.

El departamento busca una solución más automatizada para planificar las rutas. El conjunto de procedimientos que se propone consiste en:

1. Primero se filtran de manera activa, por parte del operador, los potenciales puntos de ignición a tener en cuenta según el historial de caída de rayos y precipitaciones de las últimas 24 - 48 h, la región geográfica y la ventana de tiempo para hacer el recorrido.
2. A partir de aquí, automáticamente, se agrupan los puntos de caída que se puedan ver desde el helicóptero y se obtienen los centroides de los puntos agrupados. También existe la posibilidad de no agrupar los puntos de impacto para forzar el recorrido sobrevolando exactamente cada punto de impacto.
3. El siguiente paso es trazar un camino óptimo entre los centroides de dichos grupos o del conjunto de impactos individuales.

4. Finalmente, se representa la ruta y los puntos de impacto en un mapa, se exporta a kml o gpx y se envía al dispositivo embarcado, ya sea una tableta o móvil, para facilitar el seguimiento de forma prevista.

Dado que no se planifican los recorridos en tiempo real, se considera que el operador dispone de tiempo para ajustar las variables y la solución propuesta.

A efectos de la realización de este Trabajo de Fin de Grado, se dará por hecho que el set de datos de trabajo está filtrado según las características deseadas por los bomberos y que, por ende, se dispone de un helicóptero para realizar la ruta. Por lo tanto, la parte que cubrirá este estudio será la de agrupación de los puntos de impacto y obtención de un camino óptimo a integrar posteriormente en un sistema de información geográfica (GIS) que permita filtrar previamente los datos y exportarlos a un formato apto para el dispositivo empleado para la navegación en el helicóptero.

Siguiendo el supuesto del filtraje de los datos a estudiar, las zonas de ignición potenciales no estarán sujetas a restricciones de vuelo dado que son zonas de vegetación en lugar de zonas metropolitanas. El algoritmo trabajará bajo el supuesto de desplazamiento en línea recta entre los diferentes puntos de la ruta considerándose despreciables los posibles desvíos por accidentes geográficos, meteorológicos o zonas de restricción de vuelo.

#### 1.4 Justificación

En 2019, los incendios forestales han sido el reflejo de la emergencia climática. El cambio climático potencia los incendios tanto en envergadura como en número, dado que debilita los recursos naturales para hacerles frente. La sequía y las temperaturas elevadas dotan al planeta de una mayor tendencia a arder. A su vez, los incendios propician el cambio climático, son una fuente de CO<sub>2</sub> y generan un derivado del hollín que potencia la fusión de los polos. Además, los bosques arrasados no pueden convertir el dióxido de carbono en oxígeno agravando el efecto invernadero. (Greenpeace 2019)

El fuego también supone una amenaza para la población y la fauna de manera directa al ser un peligro para cualquier forma de vida.

Para poder contener las llamas, la energía máxima que emite el incendio debe ser de 10000 kW. Los incendios en Australia de este año y lo que caracteriza a los incendios

extremadamente virulentos que se están dando en los últimos años es que emiten más energía y ponen en riesgo la vida del bombero. Además, si el incendio es suficientemente intenso, el aire caliente que generan llega a la atmósfera y al encontrarse con el aire frío se crean nubes de tormenta que provocan vientos muy fuertes que cambian la dirección de propagación de los incendios.(Martínez Rull 2020) También puede lanzar ascuas o generar relámpagos sin lluvia, que pueden dar lugar a un punto nuevo de ignición relativamente lejos del incendio. (Martins 2019)

La principal causa de destrucción de los bosques mediterráneos son los incendios forestales y la Dirección General para la Biodiversidad analizó en 2007 que el 4,31% de los incendios en nuestro país fueron causados por rayos y la superficie que quemaron fue del 2,9% de la total arrasada por el fuego. Se ha determinado que los incendios causados por rayos suelen ser más devastadores que los intencionados puesto que suceden en lugares de más difícil acceso y, por lo tanto, son más difíciles de detectar y extinguir. El estudio de incendios causados por rayos también preocupa en zonas como Alaska, Finlandia, Canadá o el oeste de Estados Unidos y se ha determinado que los rayos causan incendios principalmente en zonas montañosas. (Pacheco, Aguado and Nieto 2009)

Desde enero hasta mayo del año 2020 se han registrado 611 incendios en Cataluña, siendo esta Comunidad Autónoma la tercera de España, con un total de 7075, en número de incendios. Es importante tener en cuenta que el 2% de estos son en áreas protegidas incluidas en la base de datos mundial *World Database on Protected Areas*. (Global Forest Watch Fires [sin fecha]; [sin fecha])

Por otra parte, los recursos económicos, humanos y temporales son limitados y deben gestionarse de manera responsable. Disminuir el tiempo de reacción implica una reducción en costes, tanto económicos como medioambientales. La obtención de un camino óptimo para un helicóptero supone un ahorro de combustible que representa un ahorro económico y una disminución en el impacto ambiental del recorrido. De la misma manera, reaccionar rápido ante un incendio permite salvar más terreno de las llamas y se disminuyen las emisiones al mismo tiempo que se conserva una mayor capacidad de fotosíntesis. Al tratarse de un caso aplicado al *Departament de Bombers* de la Generalitat de Catalunya, evitar el malgasto monetario e implementar sistemas eficientes como puede ser automatizar la

obtención de recorridos para el helicóptero de bomberos resulta indispensable y supone un beneficio para la población.

## 2. Desarrollo

Para empezar, se estudia la situación actual de las investigaciones en materia de incendios naturales y se comparan las herramientas de tecnologías de la información y de comunicaciones (TIC) que apliquen a la problemática de este estudio.

### 2.1 Antecedentes

Se presentan los análisis y las herramientas de los que se disponen actualmente para la resolución del problema.

#### 2.1.1 Incendios causados por rayos

Con el análisis de Pacheco *et al.* (2009) se ha intentado predecir anteriormente la ocurrencia de incendios según diferentes variables como son el clima o la topografía, entre otras. Estos análisis demuestran que los Pirineos y la costa mediterránea se encuentran entre los lugares más comunes de la España peninsular donde los rayos suponen la causa principal de incendios naturales. También indica que el clima mediterráneo de montaña, con más de un 30% de superficie quemada, y el mediterráneo litoral, con entre el 25% y el 30% de superficie quemada, son de los que más tienden a arder. Esta investigación insta a crear modelos de ocurrencia de incendios y a diseñar planes de defensa a nivel regional.

El aumento de temperaturas augura un aumento en incendios provocados por rayos en el área del Mediterráneo. Por otra parte, ciertos fenómenos climáticos han aumentado su influencia en los incendios forestales en los últimos años. (Rodríguez 2019; Servimedia 2018) El cambio climático implica inviernos más secos, que significan tierra y manantiales menos húmedos, y veranos más cálidos, que evaporan la humedad del suelo. (Servimedia 2018) Se dice que una parte de los incendios de Australia de principios de año fue causada por tormentas de rayos, que, a su vez, fueron causadas por las condiciones meteorológicas derivadas de los incendios. (OSBO digital 2020)

WWF sostiene que la lucha contra incendios debe afrontarse desde las causas. Los rayos son la única causa natural de incendios en España. Entre 1998 y 2003 los incendios causados por rayos supusieron un casi un 4% del total, y un 6% de los de causa conocida. En Cataluña los rayos son la cuarta causa de incendio forestal, de un total de más de cuarenta causas entre las que distingue WWF. Consideran un punto a favor en la lucha contra incendios que sea una causa conocida, dado que se puede intentar paliar desde el segundo enfoque que sería la



búsqueda de soluciones a la vulnerabilidad. La recomendación para actuar frente a estos incendios, dado que no tienen responsables, consiste en la detección como son el desarrollo de sistemas de alerta y localización de impactos. (Gómez and Romero 2005)

Entre 2004 y 2013, los incendios forestales causados por rayos seguían suponiendo el 4% de los totales y el área mediterránea fue una de las más afectadas. Es posible que un incendio causado por el impacto de un rayo tarde entre uno y dos días en hacerse visible. Estos rayos son los denominados rayos dormidos o latentes, que penetran hasta las raíces del árbol y generan una combustión en el interior hasta que prende el árbol. Si hay un cambio de condiciones meteorológicas, como el viento o la humedad, un árbol con un rayo latente en su interior puede prender de golpe. (Rodríguez 2019)

En resumen, un gran número de rayos, el calor y la sequía son factores clave para que un se produzca un incendio forestal. (Europa Press 2018)

En 2018, el procedimiento para la prevención y extinción de incendios contemplaba la obtención de ubicaciones de puntos de caída de rayos, de tormentas y la vigilancia de las zonas afectadas. Esto conllevaba la necesidad de aumentar los recursos, ya sean humanos o de material, para monitorizar las zonas candidatas a arder. La precisión a la hora de localizar el incendio y transmitir esa información, se menciona como una de las problemáticas de ese verano. (Europa Press 2018) Esto evidencia la importancia de optimizar la vigilancia tanto a un nivel de costes como a un nivel de obtención y transmisión de información.

#### 2.1.2 Minería de datos

*Machine learning* o aprendizaje automático es la disciplina que permite a los ordenadores aprender sin necesidad de un código explícito. Es decir, dotar a los ordenadores de la capacidad de adquirir comportamientos a partir de la experiencia. (Ng [sin fecha])

Existen dos tipos de aprendizaje, supervisado y no supervisado. En el primero se conocen las entradas y sus salidas correspondientes de datos. Se plantea de dos maneras diferentes según la naturaleza de estos. El método de la regresión se usa si los datos son continuos; si, por el contrario, son discretos se trata de un problema de clasificación en el que se pueden tener en cuenta una cantidad muy elevada de atributos. (Ng [sin fecha]; [sin fecha])

En la Figura 1 se describe el método de regresión.

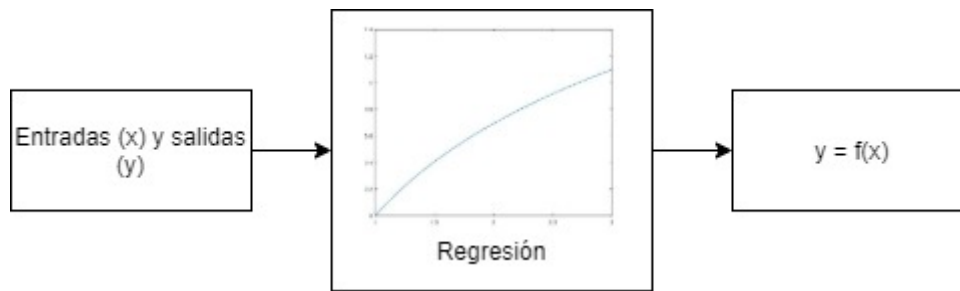


Figura 1. Diagrama de flujo del método de regresión

El método de clasificación se puede representar como muestra la Figura 2.

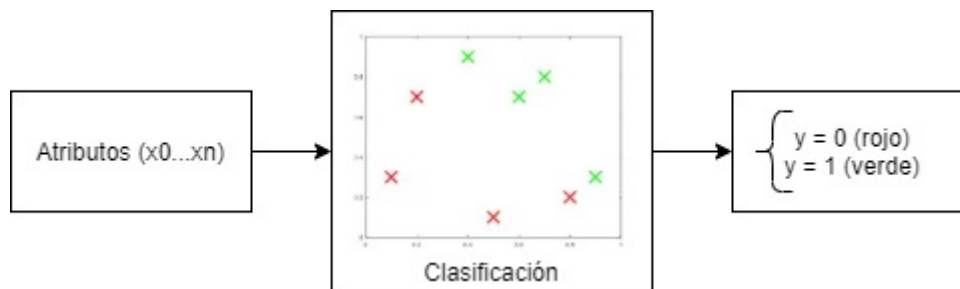


Figura 2. Diagrama de flujo del método de clasificación

El aprendizaje no supervisado consiste en encontrar patrones en series de datos de las que no se conocen las características.

El *clustering* o algoritmo de agrupamiento es una de las opciones para tratar este tipo de datos que consiste en crear grupos (clústers) de datos con características similares, aunque el significado de estas sea desconocido. Un algoritmo para agrupar datos desordenados es el K-medias (del inglés *k-means*). Es el más popular y consiste en un proceso iterativo en el que se sitúan de manera aleatoria los centroides de los clústers a encontrar, se asignan los datos a estudiar al centroide más cercano y se mueven dichos centros al promedio de los valores para repetir los últimos dos pasos hasta que la solución converja y los grupos queden fijos (Ng [sin fecha])

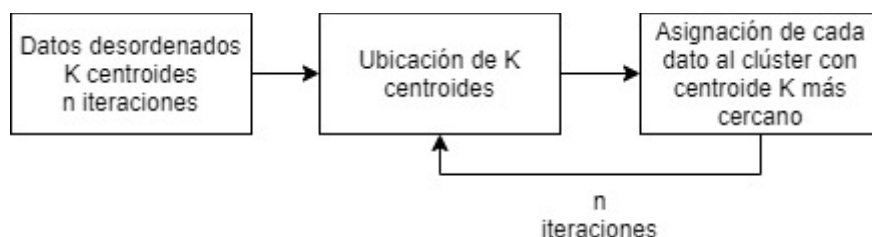


Figura 3. Diagrama de flujo de K-medias

### 2.1.3 Caminos óptimos

Los algoritmos para encontrar caminos óptimos buscan unir nodos, en este caso los centroides, mediante arcos, que suponen los segmentos del camino final. A los arcos se les asignan pesos en los que basar la optimización. La idea detrás de los pesos consiste en dar un valor para contabilizarlo al buscar el coste del camino. Entendiendo coste en el sentido de cuantificar para poder evaluar y comparar caminos, no necesaria o exclusivamente monetario (Waldschmidt 2008).



*Figura 4. Elementos del algoritmo de caminos óptimos*

Existen dos tipos de algoritmos, algoritmos exactos y algoritmos heurísticos. Los primeros devuelven una solución óptima, los segundos devuelven una solución dentro de unos intervalos próximos a la óptima o una solución, no necesariamente óptima pero cuyo cálculo ha sido más rápido, según como se aproxime. Para garantizar un resultado casi óptimo en los últimos, su pueden aplicar métodos metaheurísticos, que son aquellos basan en la observación del entorno.

Los algoritmos exactos son los algoritmos de búsqueda exhaustiva. Hay dos métodos para repasar las soluciones, el retroceso y la criba. El retroceso busca soluciones globales extendiendo soluciones parciales y retrocediendo si no se evoluciona de manera correcta. La criba consiste en eliminar lo que no sean soluciones.

La heurística puede utilizar métodos aproximados o metaheurísticas. Los métodos aproximados consisten en montar la solución poco a poco a base de mejorarla en distintos pasos a base de buscar posibles mejoras o a base de dividir el problema. Los métodos de búsqueda parten de una solución conocida y la mejoran o bien analizando todas las mejoras y escogiendo la que más ayuda a alcanzar el objetivo o la primera que lo hace. Los métodos metaheurísticos son aquellos que imitan comportamientos de la naturaleza, ya sean a nivel celular o relacional entre miembros de una misma especie.

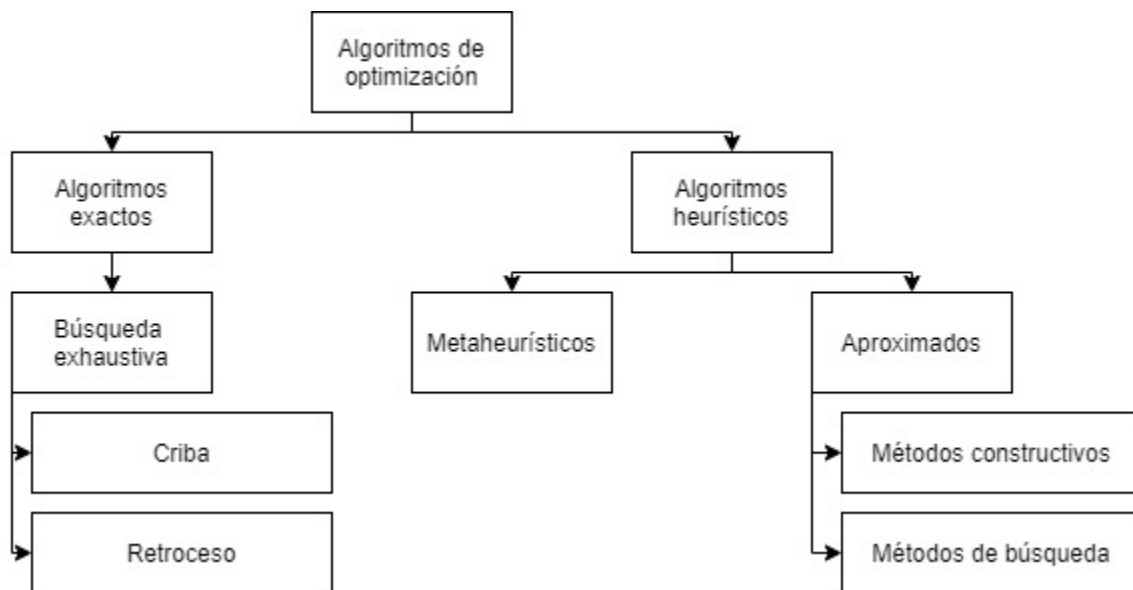


Figura 5. Resumen de algoritmos de optimización

Una manera muy extendida de resolver problemas de optimización es recurrir a problemas conocidos y estudiados con anterioridad a los que se puede aplicar una o varias de las técnicas mencionadas. (Vidal Esmorís 2013)

## 2.2 Planteamiento y selección de alternativas escogidas

### 2.2.1 Clustering

Se dispone de datos de caída de rayos en la geografía catalana en un día en concreto y se pretende encontrar un camino para recorrer estos lugares con un helicóptero. No tiene sentido hablar de un problema supervisado dado que no tenemos unas entradas y unas salidas a un problema. En el caso de los estudios sobre ocurrencia de incendios sí se disponía de datos sobre lugares de caída de rayos y su posterior conversión, o no, en punto de ignición. En este caso se trabaja con unas coordenadas que se deben revisar, independientemente de las características del rayo o de su aplicación.

Para programar algoritmos de *machine learning* se pueden utilizar diferentes lenguajes de programación. Dado que este estudio requiere un aprendizaje del método desde cero y dado que en los cursos online de formación se propone la resolución en Matlab u Octave, se han valorado estas dos alternativas. Ambos son lenguajes orientados al cálculo numérico y para trabajar con coordenadas y distancias se adaptan bien. Octave es un entorno de programación gratuito y de software libre, es decir, está permitido utilizarlo para cualquier finalidad y se puede instalar y utilizar sin una aportación económica.

### 2.2.2 El problema del vendedor ambulante

El problema del vendedor ambulante (TSP, Travelling Salesman Problem) es un problema conocido que responde a la cuestión de pasar por todos los nodos de manera que la distancia (arcos) total recorrida sea la menor. Es un conocido problema al que se recurre en problemas de optimización por su versatilidad en aplicaciones para trazar caminos. (Lutz-Westphal 2006)

El TSP pertenece a una clase de problemas para los que no existe ningún algoritmo eficiente. Se puede resolver con la denominada *fuerza bruta* o búsqueda exhaustiva porque se analizan todas las soluciones, de manera que se encuentra una óptima pero también se invierte mucho tiempo, de ahí que no sea eficiente para problemas con muchos nodos. También se puede obtener una solución aproximada, de manera más eficiente, pero sin la certeza de que sea la de mínimo coste. (Anaya Fuentes et al. 2018) Se podrían aplicar heurísticas constructivas, para obtener un óptimo a la primera, o de búsqueda para obtener mejoras de manera iterativa. (Hoffman, Padberg and Rinaldi 2013)

Al buscar un camino que pase por todos los nodos y vuelva a la base de salida, el trayecto será un círculo cerrado conocido como ciclo hamiltoniano. (Hoffman, Padberg and Rinaldi 2013) Al tratarse de arcos que se pueden recorrer en ambos sentidos el problema es simétrico, pero dado que el peso se puede reducir a las distancias y estas son euclidianas, el problema es el de un TSP euclidiano. (Korte and Vygen 2008)

### 2.2.3 Coordenadas UTM

Para poder calcular distancias en metros es necesario cambiar las coordenadas a UTM, las siglas de Universal Transverse Mercator. La zona de la Tierra a estudiar se proyecta sobre un plano, de manera que la representación es una cuadrícula recta. Esta representación puede presentar distorsiones considerables a medida que se acerca a los polos, pero para este ámbito de aplicación se considera suficientemente preciso. Estas coordenadas están expresadas en metros, por lo tanto, las distancias con las que se va a trabajar también estarán en metros.

### 3. Desarrollo de la solución propuesta

Los datos aportados por el *Departament de Bombers de Catalunya* incluyen muchas variables innecesarias para trazar los puntos de caída en un mapa. Primero se edita el documento para guardar únicamente las coordenadas de latitud y longitud en UTM en forma de matriz (X). Donde las filas son los distintos rayos y las columnas, dichas coordenadas.

Un set de datos antes de editar es poco representativo como se ve en la siguiente figura.

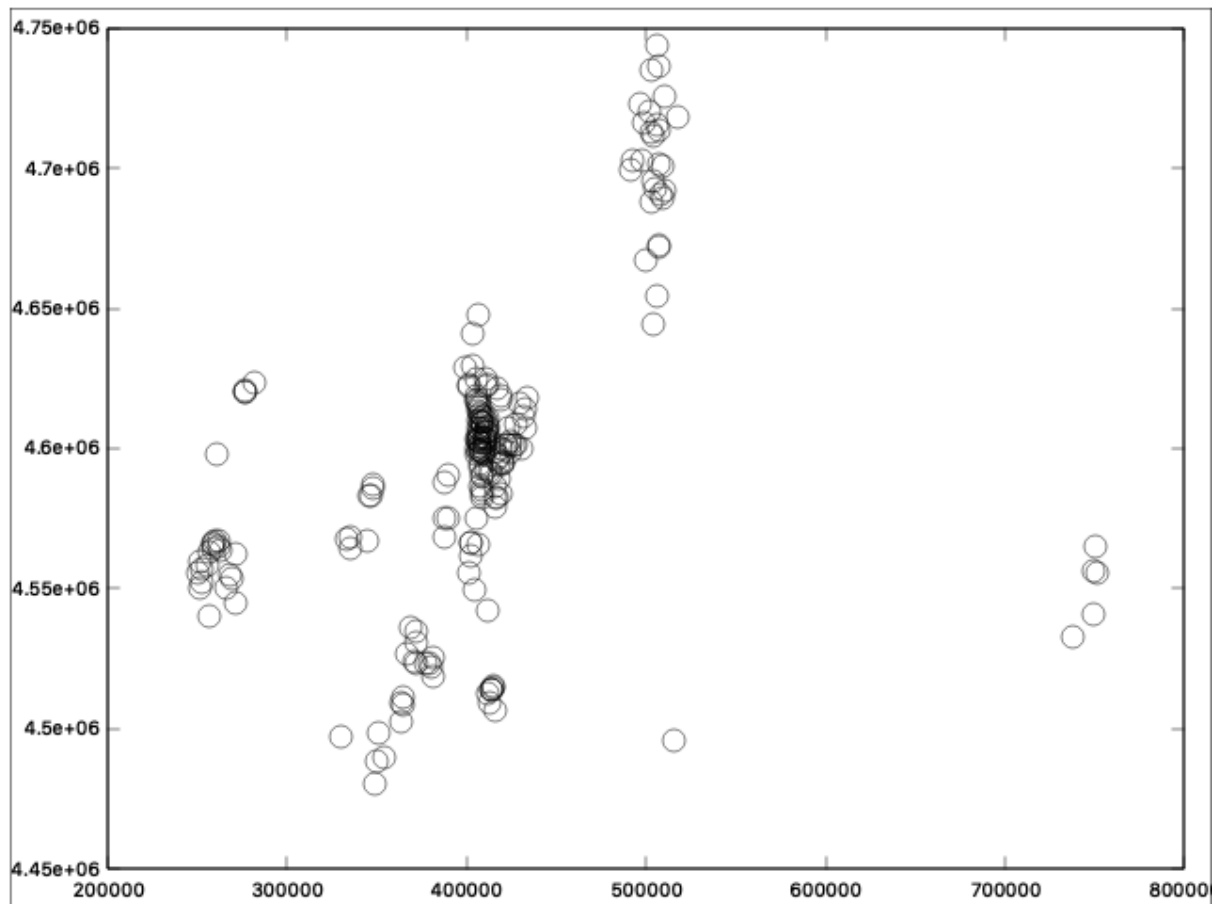


Figura 6. Representación de los puntos de caída de rayos

#### 3.1 Obtención de clústers

Los algoritmos de *clustering* pueden depender de distintas variables. Pueden construir grupos en base a diferentes características que interesa que se cumplan. En este apartado se exponen dos algoritmos distintos, *K-medias* y *DBSCAN*, y las razones por las que se rechaza el primero y se escoge el segundo.

### 3.1.1 K-medias

Se indican los números de clústers o centroides ( $K$ ) y el número de iteraciones máximas. Para escoger el número de grupos se puede utilizar el denominado método del codo que consiste en ver para qué valor de  $K$  disminuye de manera drástica la distancia entre los puntos asignados a un grupo y su centroide. Su nombre se debe a la representación gráfica de la distancia intra-clúster frente al número de centroides ( $K$ ), donde en algunos casos se puede apreciar un codo para el valor de  $K$  buscado. En la siguiente imagen se ve un caso en el que el número de grupos ( $K$ ) idóneo sería 3.

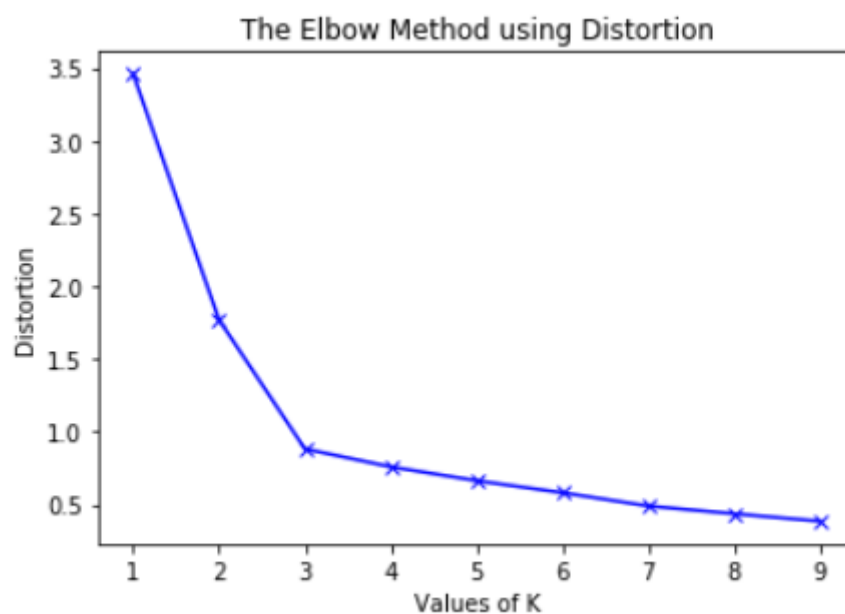
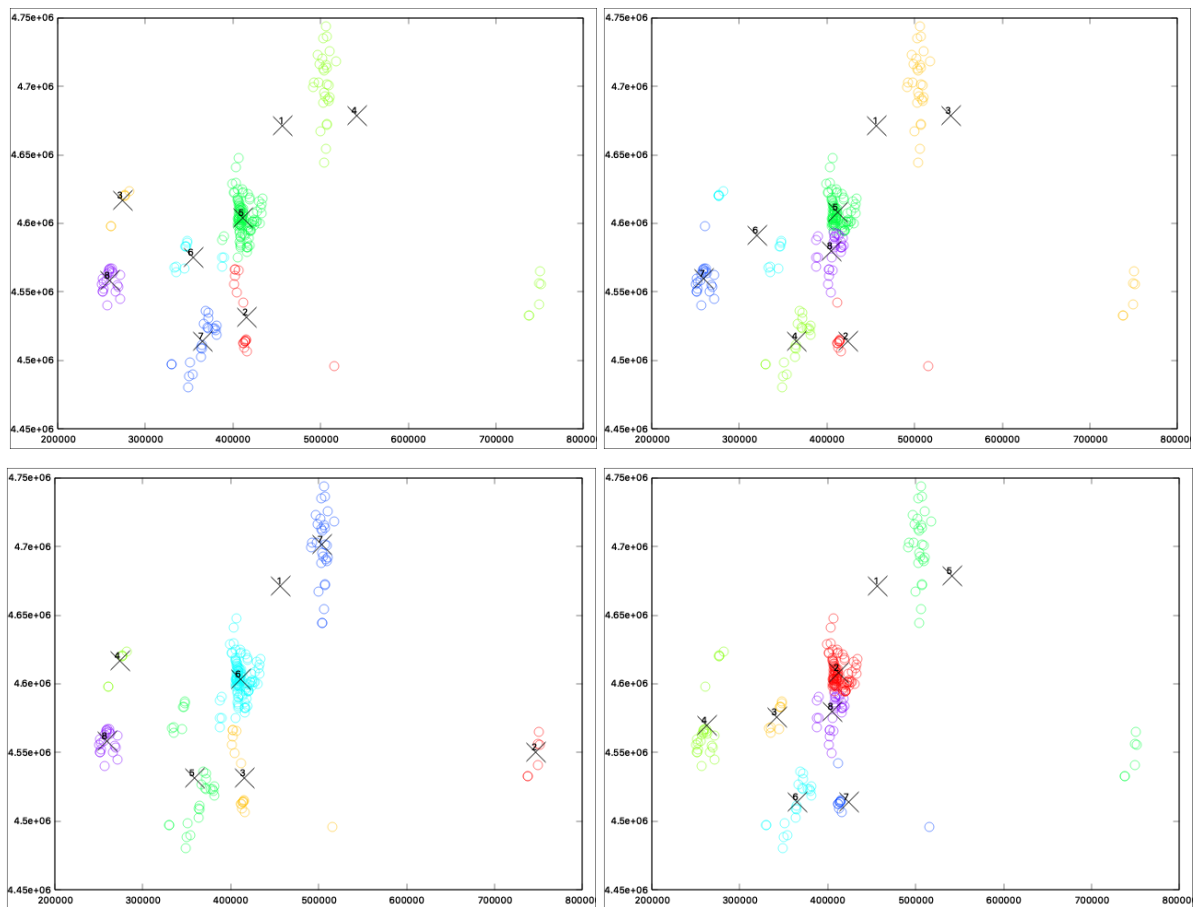


Figura 7: Gupta, A. El método del codo. (Gupta [sin fecha])

Este método no siempre da resultado dado que no siempre habrá una clara disminución de pendiente en la gráfica y está desaconsejado si se puede tomar una decisión teniendo en cuenta la aplicación final del algoritmo. (Ng [sin fecha]) En este caso se buscará una configuración que permita ver desde el centroide todos los puntos de caída del clúster.

Se pone un número máximo de iteraciones, pero el bucle se rompe si hay dos iteraciones seguidas con la misma configuración de centroides. Es importante mencionar que la solución que se obtiene depende de la ubicación de los centroides iniciales. En la práctica y para según qué casos, se puede dejar correr el programa varias veces con ubicaciones de centroides iniciales diferentes para escoger la configuración más idónea.

A continuación, una visión general de distintas configuraciones finales para 7 clústers con centroides iniciales aleatorios.



*Figura 8. Comparativa de configuraciones finales para K=7 y diferentes centroides iniciales*

En este caso, los centroides se inician de manera aleatoria seleccionando puntos de caída dados en la matriz a estudiar. Se podrían escoger visualizando los datos, escogiendo coordenadas de la geografía catalana o aplicando los resultados de los estudios sobre incidencia de rayos y escoger coordenadas que por topografía puedan estar cerca de zonas de caída de rayos. Dado que no necesariamente llueve en toda Cataluña al mismo tiempo y que conocer la zona no implica conocer las coordenadas de memoria, lo más práctico es programarlo de tal manera que los centroides iniciales se seleccionen automáticamente a partir de los datos a tratar.

Con estas variables se puede dejar correr la función k-medias propiamente dicha. Esta función calcula la distancia euclidiana de cada punto a cada centroide y se selecciona, para cada



punto, el centroide que esté más cerca. Esto se guarda en un vector auxiliar (*idx*) que contiene la asignación al centroide de cada punto de caída. Para el propósito de este estudio también se muestra la asignación de todos los puntos y la localización de todos los centroides tras cada iteración. Después se calcula la media entre las distancias de cada grupo para reubicar el centroide y se repiten estos últimos pasos hasta que los centroides dejen de moverse o se llegue al máximo de iteraciones especificado.

En la figura final se devuelven las ubicaciones de los puntos de impacto y los centroides numerados.

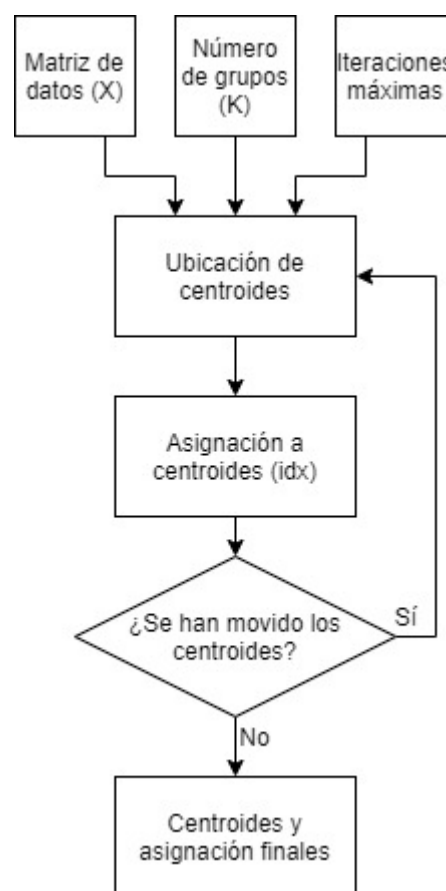


Figura 9. Diagrama de flujo de la propuesta de solución

Para que se vea claramente el funcionamiento del algoritmo de *clustering*, se muestra un ejemplo para tres clústers:

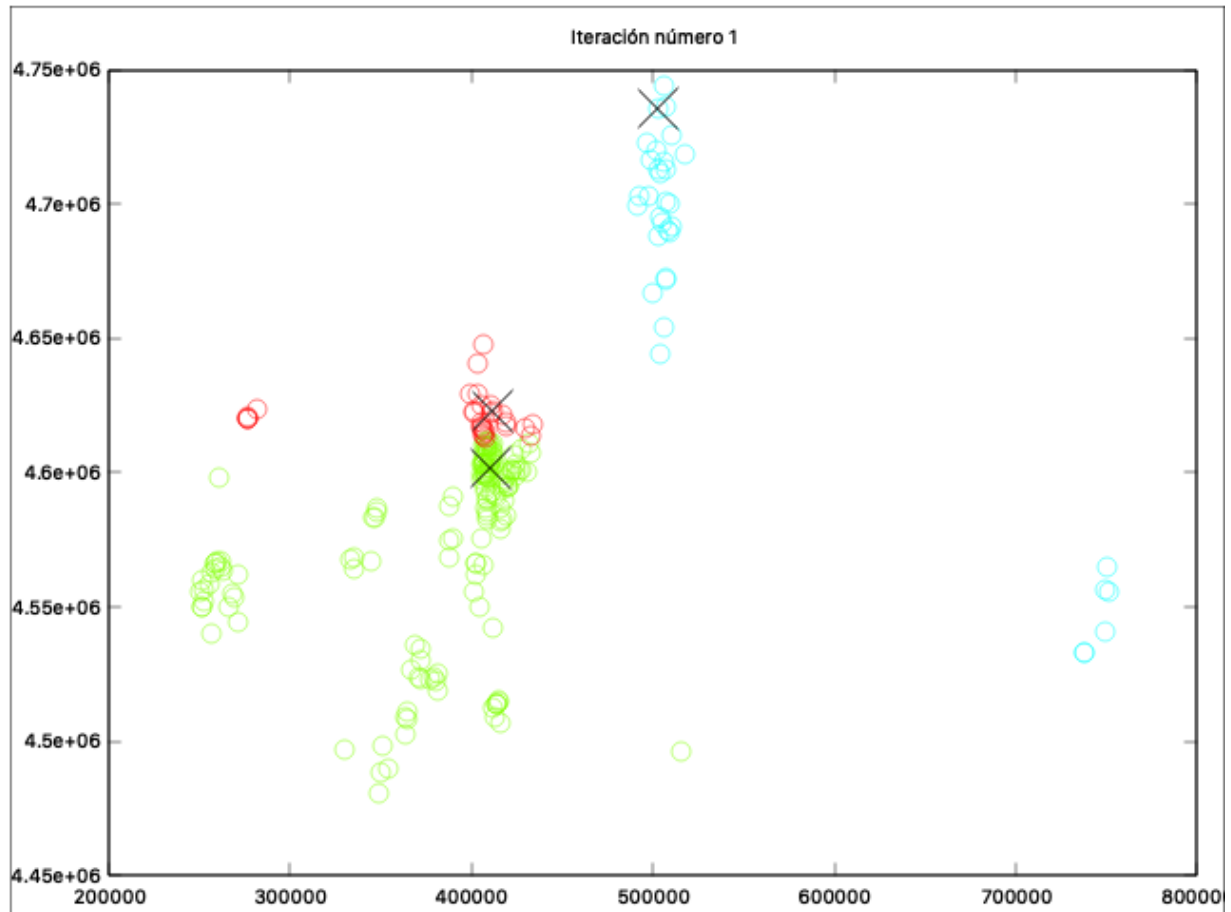


Figura 10. Selección de centroides iniciales

Primero se seleccionan los centroides aleatorios del ejemplo de arriba resaltados con una x. Se deja correr el programa hasta que dejen de moverse los centroides. Cada nueva ubicación se añade y se une a la anterior con líneas:

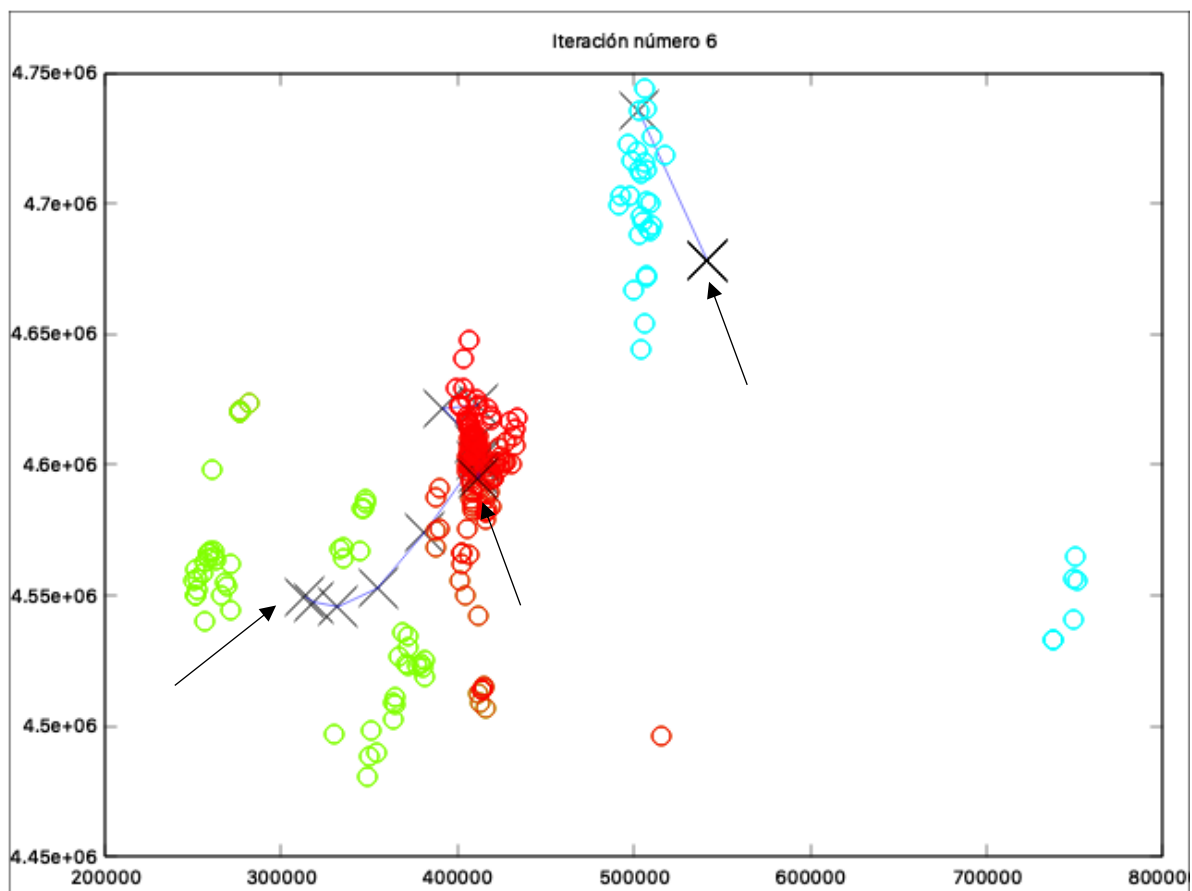


Figura 11. Evolución de la ubicación de los centroides

Es evidente que, para la aplicación deseada, esta configuración no tiene sentido porque desde los centroides no se puede ver toda el área asignada a estos. No obstante, se puede ver de manera más clara como se reubican los centroides y como algunos encuentran su ubicación final antes (el azul) que otros (el verde) y no se acaba el bucle hasta que no han llegado al óptimo todos los centroides.

Es un buen ejemplo, también, de como se obtiene un resultado que no necesariamente cumple la restricción de visibilidad desde el centroide y de que hace falta variar el número de clústers y evaluar cada vez si son suficientes, por lo que se necesita una persona que lo evalúe o editar el algoritmo para que itere sobre el número de grupos (K) y calcule la distancia entre los elementos de un grupo. Más adelante, hará falta obtener la distancia entre centroides y podría parecer una buena idea aprovechar este cálculo para valorar la bondad del algoritmo

k-medias y agilizar el proceso global. Sin embargo, es posible que dos centroides estén muy separados, pero no necesariamente haya puntos de impacto a visitar entre ellos.

### 3.1.2 DBSCAN

Para escoger el número de grupos hay que tener en cuenta el radio de visibilidad, pero, a su vez, este depende del número de puntos de impacto y la situación en el mapa. Otra manera de verlo es decir que depende de la densidad de puntos de impacto y esta no es constante en toda la zona.

El algoritmo *dbscan* pide la distancia máxima entre puntos que puede darse dentro de un grupo. Se puede decir que admite el valor del radio de visibilidad. Además, también pide el número mínimo de puntos sobre el mapa que debe contener un grupo para considerarlo como tal. En este caso, no tiene sentido rechazar datos porque ya están prefiltrados y porque interesan en muchos casos estos rayos que caen alejados porque no suelen ir acompañados de precipitación. Este algoritmo se suele usar para buscar patrones en imágenes y es capaz de clasificar ciertos grupos como ruido si no son lo suficientemente grandes.

El algoritmo asigna el primer punto de impacto como centroide y se pregunta si el siguiente está lo suficientemente cerca como para crear un grupo o empieza otro. Para distinguir entre ruido o grupo, cuenta el número de elementos de un grupo y si no llega al mínimo estipulado desecha dicho grupo. En este caso, no se eliminarán puntos de impacto porque el número mínimo de elementos es uno (1) y si no hay suficientes puntos de impacto para formar un grupo, el punto de impacto será su propio clúster y su propio centroide.

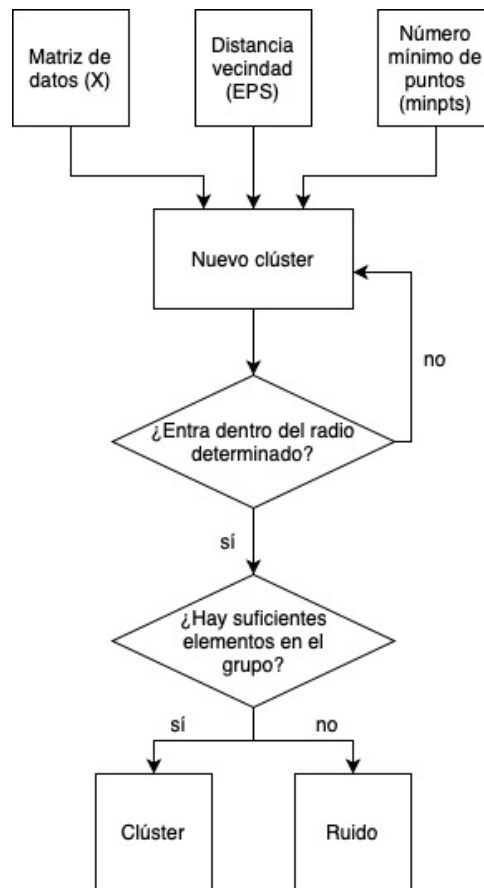


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo DBSCAN

En este caso, el algoritmo no es iterativo, con lo cual no se recalculan agrupaciones, lo que puede llevar a superposición de grupos y los centroides están numerados siguiendo el orden de la matriz de datos. El orden de la matriz es temporal por lo que a grandes rasgos sigue el sentido de la tormenta sobre el mapa.

En resumen, el segundo algoritmo es más directo para esta aplicación porque permite obtener los grupos sin necesidad de iterar y con la seguridad de que se cumple la condición de visibilidad desde el centroide.

Tabla 2. Tabla resumen de las propiedades de los algoritmos de clustering

	K-medias	DBSCAN
Variables conocidas	NO	SÍ
Garantiza visibilidad	NO	SÍ
Grupos claramente delimitados	SÍ	NO

Para la aplicación final es más importante garantizar la visibilidad y automatizarlo el máximo posible. La superposición de grupos no es un problema pues un mismo punto de impacto se podría visitar desde dos centroides distintos.

Estos resultados parciales se han presentado al cuerpo de bomberos y han valorado muy positivamente un algoritmo como *dbscan*.

### 3.2 Cálculo de caminos óptimos

Se quiere obtener un camino que una todos los centroides con la base desde la que salga (y a la que regrese) el helicóptero. Para ello hay que añadir la base después de agrupar para que no se incluya en ningún grupo y se visite seguro esa coordenada. Se han probado tres algoritmos de resolución hasta hallar uno que aparentemente devuelve rutas sin cruces, es decir, más directas, y es capaz de resolver el problema con el volumen de datos con el que se trabaja.

#### 3.2.1 Algoritmo de fuerza bruta

El primer enfoque utilizado es el de la fuerza bruta en el que se permutan todas las opciones posibles y se escoge la mejor. Este algoritmo primero forma una matriz de permutaciones, de manera que guarda todos los datos y a final escoge. Para el ejemplo anterior de 3 clústers es suficiente. El número de permutaciones es factorial de K (número de clústers), para 10 grupos ya son más de 3 millones de permutaciones que requieren mucha memoria y tiempo de cálculo y no se puede resolver con el ordenador personal.

#### 3.2.2 Algoritmo de variaciones aleatorias

Para obtener propuestas de caminos, primero hay que fijar la ubicación de la base y añadirla al vector de centroides. En un caso real, estas coordenadas vendrían dadas en el prefiltraje y los puntos de caída serían puntos que se visitan desde dicho helipuerto. La base se añade en la primera fila y su índice dentro del programa es el uno (1).

La obtención de las distancias se realiza mediante funciones (*pdist* y *squareform*) disponibles en el paquete de estadística de Octave. Para simplificar la utilización de este código, se han añadido como funciones a la carpeta anexada. Se calculan las distancias euclidianas con la función *pdist* que devuelve un vector de distancias de cada centroide a todos los demás siguiendo el orden en el que se han entrado los datos en la función, es decir, siguiendo el orden de los índices.

Para calcular las distancias, o lo que es lo mismo, el coste, se guarda la información en forma de matriz, para poder acceder a ella de manera más sencilla. Esta matriz guarda en cada columna (o fila) las distancias desde un centroide a todos los demás como muestra la parte coloreada de la siguiente tabla:

*Tabla 3. Explicación de la matriz de distancias*

Centroide	Base	1	2
Base	0	Distancia centroide 1 a base	Distancia centroide 2 a base
1	Distancia base a centroide 1	0	Distancia centroide 2 a centroide 1
2	Distancia base a centroide 2	Distancia centroide 1 a centroide 2	0

Las distancias son valores absolutos, de manera que la matriz es simétrica. Esto resulta práctico para buscar la distancia de cada tramo, pues solo hay que buscar la casilla que conecta los centroides de cada extremo.

Para diseñar la ruta primero se escoge de manera aleatoria con la función *randperm* y el número de centroides (K) el orden de centroides a seguir y se fija la base como el inicio y el fin sumando uno (1) a cada entrada y añadiendo el índice 1 al principio y al final. De esta manera, la base, que se ha impuesto como primera entrada del vector de centroides después de agrupar, será el inicio y el fin del recorrido. Se calcula el coste o la distancia de este recorrido.

Sobre el primer camino propuesto se hacen variaciones aleatorias del orden de los centroides sin tocar el inicio ni el fin y se compara el coste del nuevo camino con el anterior para eliminar el mayor. Este último paso se repite varias veces.

Finalmente se obtiene el orden de los centroides y la distancia en metros a recorrer.

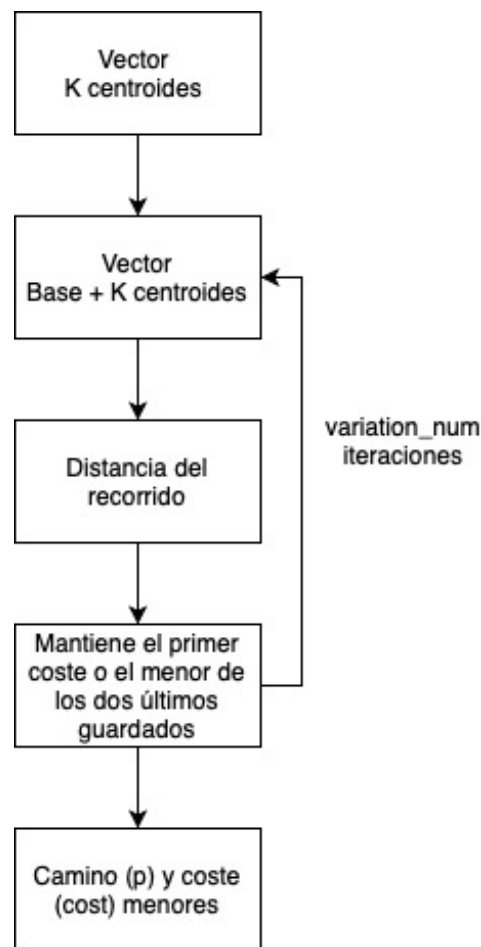


Figura 13. Diagrama de flujo del algoritmo de caminos óptimos

Los caminos propuestos por este algoritmo suelen tener bastantes cruces y no parecen ser la manera más directa de recorrer los centroides aunque sea el trayecto más corto de los estudiados por el algoritmo.

Desde el cuerpo de bomberos, tras presentar estos resultados, indican que no les resulta imprescindible encontrar el camino más corto, siempre y cuando se cumplan las condiciones de visitar las coordenadas de interés y hacerlo en máximo 300 km. Es decir, aceptan el condicionante práctico de que estos algoritmos encuentran generalmente una buena solución pero que no es necesariamente la óptima.

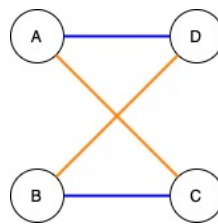
### 3.2.3 Algoritmo de búsqueda de cruces

Dado el problema de encontrar un camino aleatorio, en mayor o menor medida, directo y la imposibilidad de comprobar todas las opciones posibles y guardarlas, se opta por buscar una manera de deshacer cruces en el trayecto para encontrar uno que, dado que el coste del trayecto es únicamente la distancia, será seguro de los más económicos.



Para ello primero se tiene en cuenta que los grupos se numeran siguiendo el orden de los datos obtenidos tras el prefiltraje, que a su vez siguen un orden temporal y, a rasgos generales, siguen el sentido de la tormenta. Con lo cual, una primera aproximación que siga el orden natural de los números (y acabe en la primera ubicación, que es la base) puede tener sentido. Después hay que deshacer cruces en el trayecto. Es altamente probable que el primer grupo y el último no sean los más cercanos a la base. También hay algunos rayos que caen sueltos en zonas aisladas en medio de la tormenta. Estos dos casos darán lugar a un trayecto que pase por el mismo sitio varias veces.

Se ha estudiado la resolución del TSP mediante el desmontaje de estos arcos que se cruzan y se ha demostrado que se obtienen caminos más cortos. La condición que se tenido en cuenta es la de la suma de distancias entre dos tramos cruzados. Suponiendo una configuración como la de la figura siguiente:



*Figura 14. Arcos cruzados*

Las distancias cruzadas (naranja) son mayores que las que no se cruzan (azul). De esta manera, se puede formular la siguiente desigualdad:

$$\text{distancia (CA)} + \text{distancia (BD)} > \text{distancia (BC)} + \text{distancia (DA)}$$

que es cierta en caso de que se crucen los arcos y que se soluciona uniendo el nodo D con el nodo A, y el nodo C con el nodo B (lado derecho de la desigualdad). («2014 International Conference on Orange Technologies.» 2014)

Por todo lo dicho anteriormente, se busca iterar sobre un camino propuesto, que será el orden natural de los centroides, en busca de trayectos cruzados para deshacerlos. Es importante repasar todas las conexiones del camino varias veces porque deshacer un cruce puede crear otro entre conexiones que ya se han comprobado. Conviene recordar que no se pueden guardar todos trayectos y, por lo tanto, es mejor repasar la ruta a tramos y hacerlo varias veces si hace falta.

El siguiente diagrama muestra el funcionamiento de este nuevo ajuste al algoritmo:

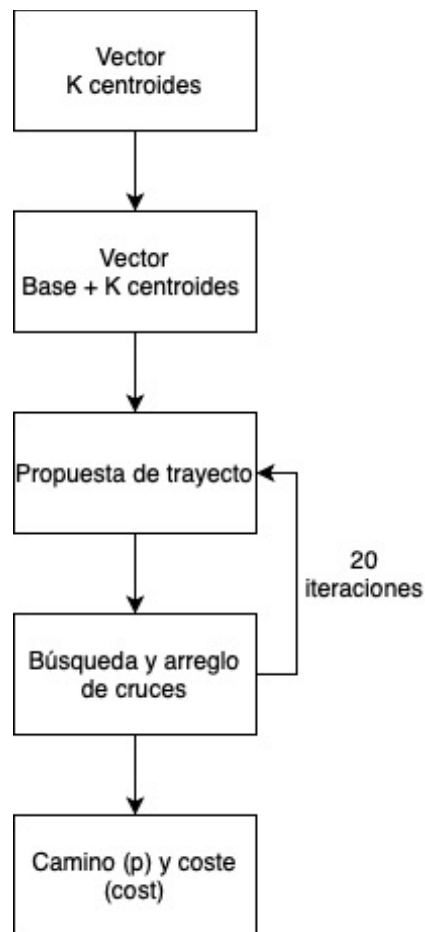


Figura 15. Diagrama de flujo del algoritmo de búsqueda de cruce de arcos

Es importante mencionar que el algoritmo deja de buscar tras una serie de iteraciones, pero no garantiza que no quede ningún cruce de arcos. A mayor número de clústers, se necesitan más iteraciones. De todos modos, de momento, se han obtenido tiempos aceptables y resultados sin cruces con el código propuesto.

Tabla 4. Resumen algoritmos de caminos óptimos

	Fuerza bruta	Aleatorio	Cruces
Garantiza solución óptima	SÍ	NO	NO
Propone resultados para un número elevado de datos	NO	SÍ	SÍ
Propone un trayecto con sentido para un helicóptero	NO	NO	SÍ

Al hablar con el cuerpo de bomberos mencionaron que no buscan el camino más corto, es suficientemente bueno si es de menos de 300 km. Con los datos reales aportados, sin prefiltrar por el cuerpo de bomberos, y el último algoritmo mencionado se trazan caminos de menos de 300 km, con lo que se puede afirmar que es suficientemente óptimo para la aplicación. Por otra parte, parece más lógico preferir un camino más directo a uno que de vueltas sobre sí mismo.

## 4. Experimentación

Se van a estudiar tres casos en los que los bomberos podrían necesitar trazar un camino en helicóptero. El primero, un caso con pocos rayos en el que no haga falta agrupar. Después dos con muchos rayos, uno sin y otro con agrupaciones. Todos con la selección final de algoritmos: *dbscan* para agrupar y el de búsqueda y eliminación de cruces para el cálculo de caminos.

Los recorridos se calculan siguiendo una línea recta unos ángulos muy marcados para ser fieles representaciones del comportamiento de un helicóptero. Para valorar si son útiles para la aplicación final, se tomará el valor de referencia que usan en la actualidad los bomberos, 300 km.

### 4.1 Tormenta seca, pocos rayos, sin *clustering*

En el caso de que no haya que agrupar los puntos de impacto, cada punto de impacto se comportará como su propio centroide. Se han escogido 10 puntos de impacto al azar de un set de datos real sin prefiltraje.

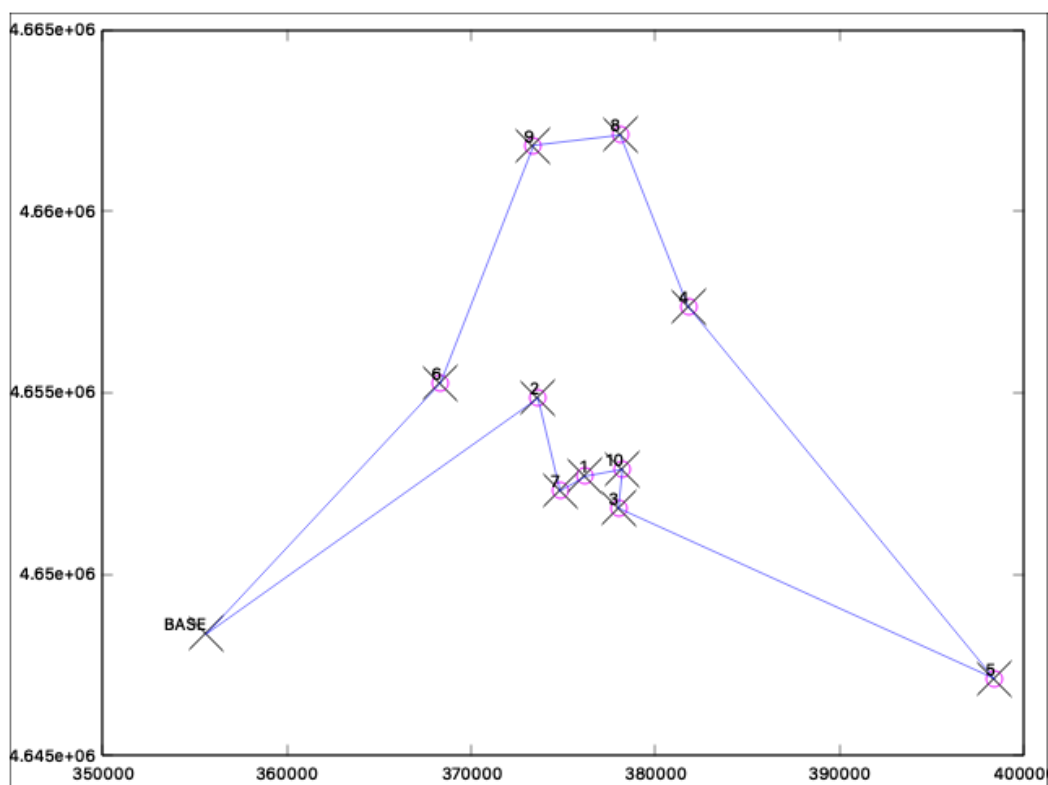


Figura 16. Recorrido para un caso de pocos rayos sin clustering

En la figura se muestra el recorrido que debe realizar el helicóptero e incluye la base con la etiqueta “BASE”. En este caso la distancia a recorrer es de 100,38 km, que entra dentro de los parámetros aceptados por los bomberos. Para tan solo 10 centroides parece mucho comparado con los casos posteriores, aún así hay que tener en cuenta que desde el departamento de bomberos no trabajan con cientos de puntos de impacto a visitar, lo reducen a una selección y que el área que cubre este ejemplo en concreto es bastante grande, aunque solo se busquen 10 coordenadas determinadas.

#### 4.2 Tormenta seca, muchos rayos, sin clustering

Para este caso también se selecciona de manera aleatoria 70 puntos de un set de datos real sin prefiltraje. Viendo la configuración siguiente, es evidente que algunos puntos de caída no habría que visitarlos uno por uno, se podría hacer un grupo. Sin embargo, este es un buen ejemplo para ver qué sucede al poner muchos centroides.

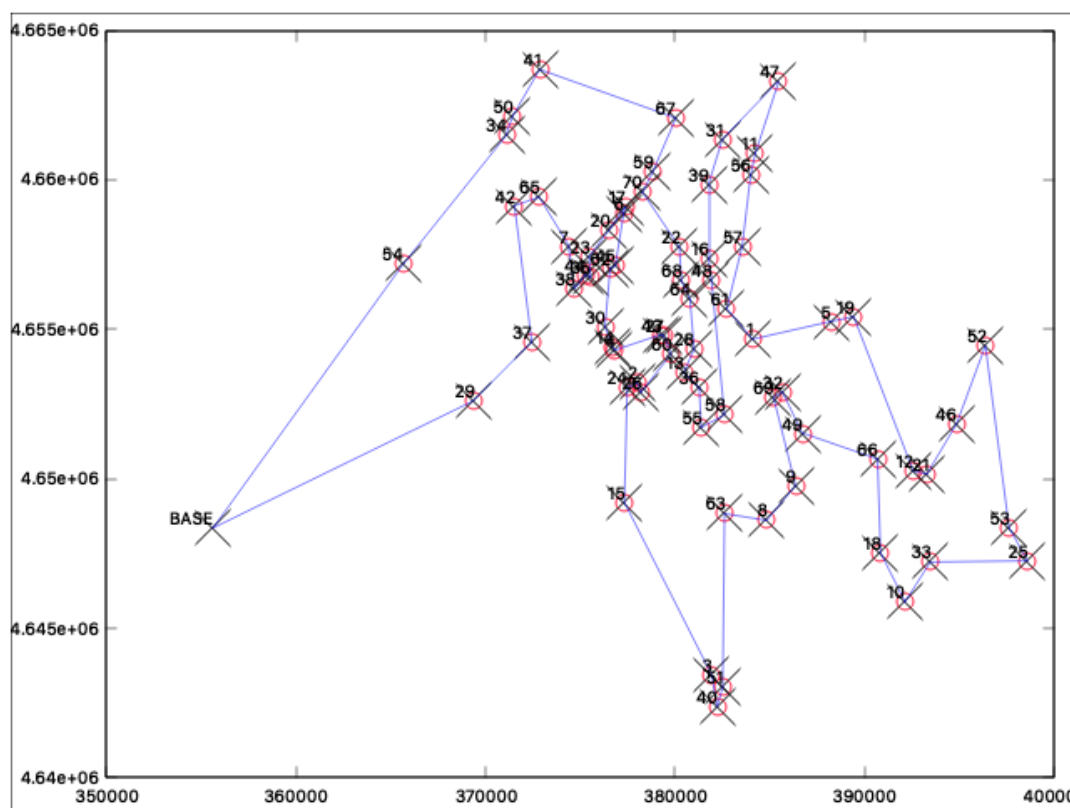


Figura 17. Recorrido para un caso de muchos rayos sin clustering

La distancia total recorrida, contando la base (“BASE”) es de 180,49 km, también correcto para los bomberos. En comparación con el caso anterior es un recorrido proporcionalmente más corto, porque el espacio que se cubre en el mapa es prácticamente igual y solo hay que añadir algún cambio de dirección.

### 4.3 Tormenta seca, muchos rayos, con *clustering*

Para este caso se ha tomado un set de datos de 225 impactos de rayo y una distancia de 2.500 m de visibilidad, el valor más alto que han mencionado en el cuerpo de bomberos. El algoritmo propone visitar 47 ubicaciones (centroides), marcados con una x y numerados con su índice en la siguiente figura. Desde los cuales se ven los puntos de impacto (aros) del mismo color.

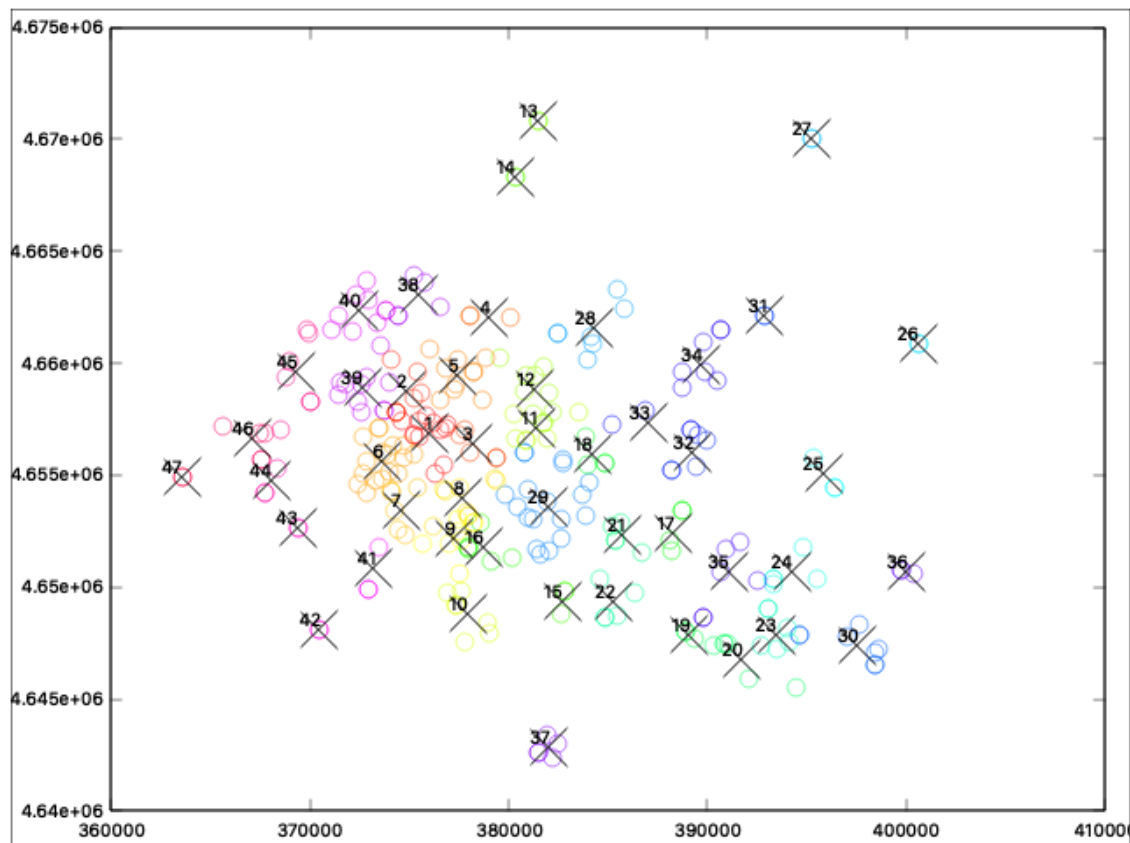


Figura 18. Clústers para el tercer caso de experimentación

La segunda parte del código propone el siguiente recorrido como indican las líneas que unen los centroides y sitúa la base como nuevo centroide etiquetada con “BASE”.

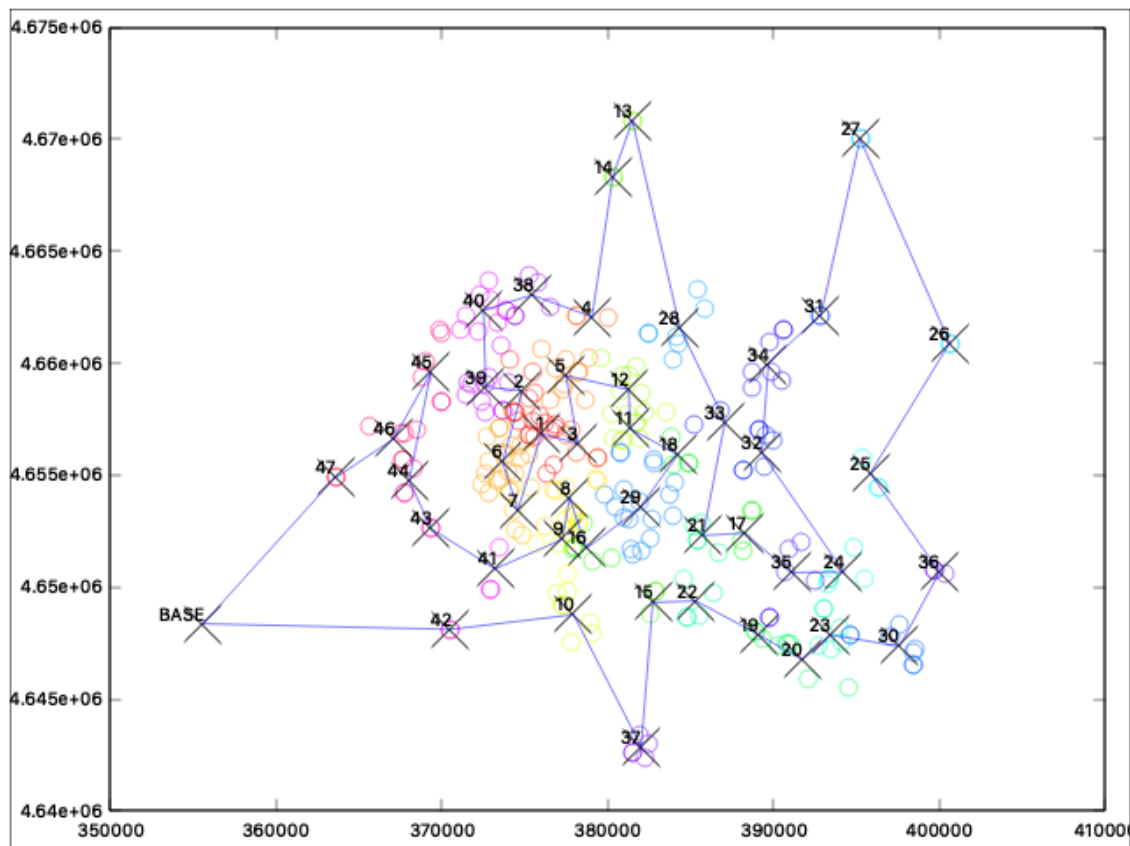


Figura 19. Ruta caso clustering y camino óptimo.

Este recorrido es de 222,42 km que es menor de 300 km y se podría recorrer en dos horas.

Considerando el radio de visibilidad de 1000 m, la primera aproximación que se consideró el menor número que ha aceptado el cuerpo de bomberos, se obtienen 122 clústers y un recorrido de 300,43 km. Este valor queda fuera del límite que sitúan, aunque al tratarse de una desviación tan pequeña y considerando que estos datos no han seguido el prefiltraje de los bomberos podría no resultar un problema en un caso real. Si realmente hubiera casos con rutas demasiado largas, habría que volver al paso previo de filtraje y eliminar más puntos de impacto.

A rasgos generales, para obtener un recorrido de menos de 300 km hay que acotar de alguna manera las zonas a visitar, el clustering es una manera muy eficaz si están muy juntos los grupos y si se garantiza un radio de visibilidad grande, de unos 2000 m. En otros casos, el filtraje que se realiza puede marcar la diferencia entre poder o no obtener un camino en 300 km.

## 5. Resultados

El estudio realizado supone un impacto económico y ambiental. También requiere una serie de adaptaciones para poder ser integrado en el sistema de información geográfico, además de unas consideraciones en cuanto a limitaciones y supuestos que cabe recordar antes de utilizar el algoritmo.

### 5.1 Resumen económico

Al tratarse de un estudio, el principal volumen de trabajo y, consecuentemente, de inversión es el tiempo dedicado a la programación. Con lo cual, el coste del tiempo de trabajo incluye los costes de material y de suministros necesarios. En el apartado de recursos necesarios para llevar a cabo el estudio, el coste por hora es de 10 € y por las 300 h de dedicación, el coste asociado al trabajo que se va a realizar es de 3000 €.

El desglose por horas del trabajo dedicado a cada tarea se encuentra en los anexos.

### 5.2 Implicaciones ambientales

El desarrollo del estudio no conlleva grandes impactos ambientales. Para llevarlo a cabo se ha usado un ordenador y, en todo caso, el impacto es aquel de la energía consumida y de la manera de generar la misma.

La aplicación del algoritmo obtenido en este estudio puede suponer una mejora del impacto ambiental frente al del método actual. Por una parte, optimizar el vuelo supone una disminución en el gasto de combustible y consecuentemente de emisiones. Por otra parte, una mayor eficiencia en la lucha contra incendios permite disminuir las emisiones de estos y evita las consecuencias meteorológicas que pueden acarrear los incendios forestales como la destrucción del ecosistema o las tormentas de rayos y, por ende, combatir factores que intensifican el cambio climático.

### 5.3 Planificación

Llegados a este punto, de cara al futuro es imprescindible integrar el código en el GIS, de manera que se puedan introducir las variables automáticamente en esta parte del código y se devuelva la ruta en el formato apto para el navegador. También resulta imprescindible que los bomberos lo prueben siguiendo su criterio y su manera de trabajar para saber si realmente es útil.



Por otra parte, es recomendable mejorar el algoritmo de obtención de caminos mínimos para que se asegure de devolver caminos sin cruces y que compruebe si el camino propuesto es de un máximo de 300 km.

Puede ser útil permitir al usuario escoger algunas variables como el radio de visibilidad, que no se ha conseguido un valor claro para todos los casos y permitir realizar más iteraciones para deshacer todos los cruces.

## 6. Conclusiones

Viendo los resultados de los algoritmos estudiados, sus combinaciones y las opiniones del cuerpo de bomberos, se puede concluir que el código propuesto resuelve el problema de agrupar asegurando visibilidad desde el centroide y trazar un camino aceptablemente corto. No asegura que sea el más corto, pero tampoco es una preocupación real del cuerpo de bomberos y tampoco asegura que no haya que dar vueltas innecesarias, aunque en las pruebas que se han realizado no da problemas. Estas limitaciones son intrínsecas al empleo de heurísticas que no garantizan la obtención del óptimo.

Un aparente problema en los estudios de incendios provocados por rayos es el del error en la ubicación del punto de impacto. Según la AEMET son del orden del hectómetro y según el cuerpo de bomberos para visualizarlo desde el helicóptero no es un problema, como muestra la imagen aportada por el *Departament de Bombers*:

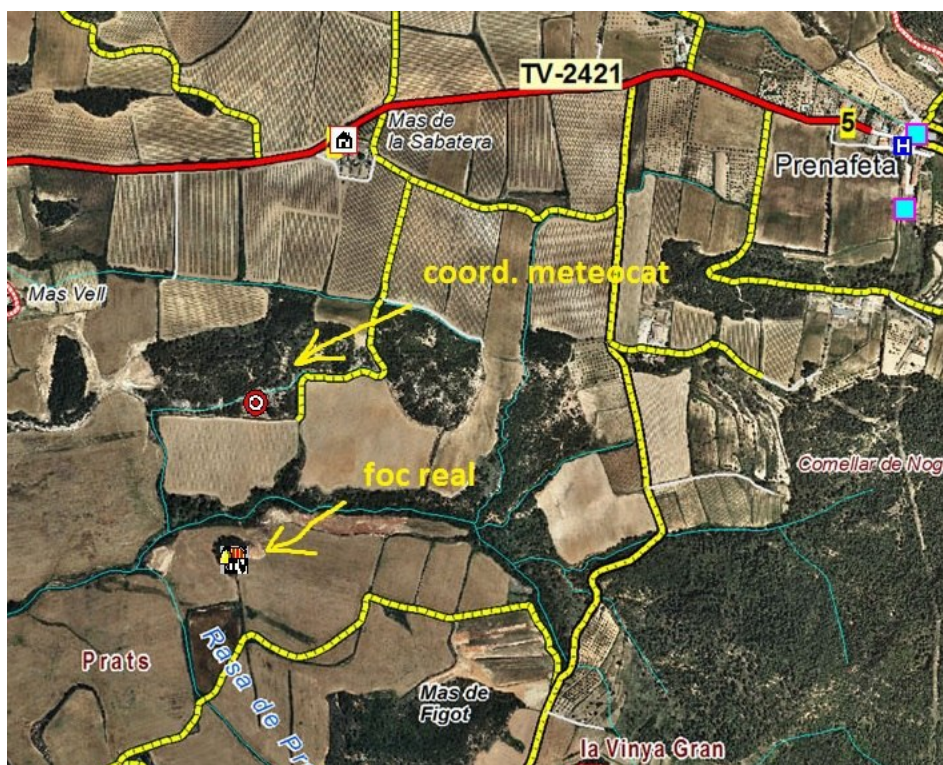


Figura 20. Visión de la localización del incendio registrada y la real. De *Departament de Bombers*.

Si bien el viento no se considera una variable explicativa a la hora de convertir un rayo en un incendio, juega un papel importante de cara a las condiciones de vuelo. En este trabajo no se ha tenido en cuenta explícitamente. De todas maneras, el cuerpo de bomberos ha informado

de que su manera de trazar un trayecto que se pueda realizar en las dos horas que marca la normativa consiste calcular 300 km y ya tienen en cuenta las desviaciones.

Por último y en el mismo orden de cosas, la velocidad no se ha tenido en cuenta en ningún momento para comprobar si el trayecto se puede recorrer en las dos horas estipuladas porque no es la manera de trabajar del departamento y no pueden asegurar una velocidad constante.

## 7. Normativa

El cuerpo de bomberos en su labor de lucha contra incendios debe ceñirse a la normativa Bravo-16 (Circular operativa 16-B) disponible en los anexos.

## 8. Bibliografía

2014 *International Conference on Orange Technologies*. [en línea], 2014. S.I.: IEEE. [Consulta: 22 June 2020]. ISBN 9781479962853. Disponible en: <http://mendeley.csuc.cat/fitxers/4fd8248f9772bb53e3b34946e175f4f0>.

ANAYA FUENTES, G.E., HERNÁNDEZ GRESS, E.S., SECK TUOH MORA, J.C. and MEDINA MARÍN, J., 2018. Solution to travelling salesman problem by clusters and a modified multi-restart iterated local search metaheuristic. *PLoS ONE* [en línea], vol. 13, no. 8. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201868>.

EUROPA PRESS, 2018. Agosto de 2018, el mes con más conatos de incendios por rayos en la Comunitat en 20 años. *Europa Press* [en línea]. 15 September 2018. Disponible en: <https://www.europapress.es/comunitat-valenciana/noticia-agosto-2018-mes-mas-conatos-incendios-rayos-comunitat-20-anos-20180915152935.html>.

GLOBAL FOREST WATCH FIRES, [sin fecha]. Fire report for Cataluña. [en línea]. Disponible en: <https://fires.globalforestwatch.org/report/index.html#aoitype=GLOBAL&reporttype=globalcountryreport&country=Spain&aois=Catalu%C3%B1a&dates=fYear-2020!fMonth-1!fDay-1!tYear-2020!tMonth-5!tDay-30>.

GLOBAL FOREST WATCH FIRES, [sin fecha]. Fire report for Spain. [en línea]. Disponible en: <https://fires.globalforestwatch.org/report/index.html#aoitype=GLOBAL&reporttype=globalcountryreport&country=Spain&dates=fYear-2020!fMonth-1!fDay-1!tYear-2020!tMonth-5!tDay-30>.

GÓMEZ, R. and ROMERO, F., 2005. Incendios forestales. [en línea]. S.I.: Disponible en: [http://assets.wwf.es/downloads/incendios\\_20051\\_1.pdf](http://assets.wwf.es/downloads/incendios_20051_1.pdf).

GREENPEACE, 2019. 2019: El año en el que los grandes incendios forestales han evidenciado la emergencia climática. *Greenpeace* [en línea]. [Consulta: 1 March 2020]. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/sala-de-prensa/comunicados/2019-el-ano-en-el-que-los-grandes-incendios-forestales-han-evidenciado-la-emergencia-climatica/>.

GUPTA, A., [sin fecha]. Elbow method for optimal value of k in KMeans. *Geeks for geeks* [en línea]. [Consulta: 1 June 2020]. Disponible en: [www.geeksforgeeks.org%2FElbow-method-for-optimal-value-of-k-in-kmeans%2F&psig=AOvVaw2S2EccF-](http://www.geeksforgeeks.org%2FElbow-method-for-optimal-value-of-k-in-kmeans%2F&psig=AOvVaw2S2EccF-)

o1YqdXNISGGsqn&ust=1590802385907000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCNCjuO321-kCFQAAAAAdAAAAABAD.

HOFFMAN, K.L., PADBERG, M. and RINALDI, G., 2013. Traveling Salesman Problem. En: S.I. GASS and M.C. FU (eds.), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* [en línea]. Boston, MA: Springer US, pp. 1573–1578. ISBN 978-1-4419-1153-7. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7\\_1068](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_1068).

KORTE, B. and VYGEN, J., 2008. The Traveling Salesman Problem. En: , *Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms* [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 527–562. ISBN 978-3-540-71844-4. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-71844-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-540-71844-4_21).

LUTZ-WESTPHAL, B., 2006. *Kombinatorische Optimierung. Inhalte und Methoden für einen authentischen Mathematikunterricht*. S.l.: s.n.

MARTÍNEZ RULL, E., 2020. Los incendios se hacen “inextinguibles” con el cambio climático. *La Razón* [en línea]. Madrid, 6 March 2020. Disponible en: <https://www.ambientum.com/ambientum/cambio-climatico/incendios-seran-peores-por-culpa-del-cambio-climatico.asp>.

MARTINS, A., 2019. Qué son las “tormentas de fuego” que cada vez son más frecuentes y por qué son tan difíciles de combatir. *BBC* [en línea]. 3 December 2019. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50588121>.

NG, A., [sin fecha]. K-means Algorithm. *Stanford University* [en línea]. Disponible en: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/lecture/93VPG/k-means-algorithm>.

NG, A., [sin fecha]. Supervised Learning. *Stanford University* [en línea]. Disponible en: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/lecture/1VkCb/supervised-learning>.

NG, A., [sin fecha]. Unsupervised Learning. *Stanford University* [en línea]. Disponible en: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/lecture/oIRZo/unsupervised-learning>.

NG, A., [sin fecha]. What is machine learning? *Stanford University* [en línea]. Disponible en: <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/lecture/Ujm7v/what-is-machine-learning>.

OSBO DIGITAL, 2020. Los incendios de Australia camino de convertirse en crisis humanitaria. *OSBO digital* [en línea]. 2 January 2020. Disponible en: <https://osbodigital.es/2020/01/02/los-incendios-australia-camino-convertirse-crisis-humanitaria/>.

PACHECO, C., AGUADO, I. and NIETO, H., 2009. Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular. *Geofocus*, vol. 9, pp. 232–249.

RODRÍGUEZ, M., 2019. Rayos latentes: los rayos “silenciosos.” *tiempo.com* [en línea]. 25 July 2019. Disponible en: <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/rayos-latentes-los-rayos-silenciosos.html>.

SERVIMEDIA, 2018. Los incendios provocados por rayos seguirán aumentando en la región mediterránea. *ABC* [en línea]. 13 June 2018. Disponible en: [https://www.abc.es/natural/cambioclimatico/abci-incendios-provocados-rayos-seguiran-aumentando-todo-mediterraneo-201806011159\\_noticia.html](https://www.abc.es/natural/cambioclimatico/abci-incendios-provocados-rayos-seguiran-aumentando-todo-mediterraneo-201806011159_noticia.html).

VIDAL ESMORÍS, A., 2013. *Algoritmo heurísticos en optimización* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: [http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto\\_782.pdf](http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_782.pdf).

WALDSCHMIDT, H., 2008. *Vergleich von Pathfinding-Algorithmen* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: [https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/PLM/Dokumente/Master\\_Bachelor\\_Diplom/masterarbeit.pdf](https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/PLM/Dokumente/Master_Bachelor_Diplom/masterarbeit.pdf).

## 9. Anexos

### I. Recursos económicos necesarios

### II. Circular operativa 16-B

### III. Código

main.m – El archivo principal a ejecutar

dbscan.m – Clustering en base a la distancia máxima entre elementos

computeCentroids.m – Encuentra los centroides de cada clúster

plotClusters.m – Superpone los puntos de caída y los centroides y los representa

pdist.m – Calcula la distancia entre puntos. Del paquete de estadística de Octave

squareform.m – Convierte el vector de distancias en matriz. Del paquete de estadística de Octave

ruta.m – Calcula la ruta que debe recorrer el helicóptero eliminando arcos que se crucen

crossPaths.m – Busca y elimina cruces de arcos

path\_cost.m – Devuelve el coste del camino total

plotFinal.m – Devuelve los centroides, los puntos asignados a cada centroide y el recorrido en una imagen

drawLine.m – Traza una línea entre dos puntos

findClosestCentroids.m – Asigna cada punto al centroide más cercano

kMeansInitCentroids.m – Selecciona de manera aleatoria los centroides iniciales

plotDataPoints.m – Crea el gráfico de dispersión de colores

plotProgresskMeans.m – Representa la evolución de los centroides en una imagen

runkMeans.m – Cálculo y asignación de centroides

tsp\_descent1.m – Algoritmo de resolución de TSP con mejoras aleatorias

tsp.m – Algoritmo de resolución de TSP por fuerza bruta